

УДК 531.391

С. А. Борисевич

Белорусский государственный технологический университет

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТВОЛА ДЕРЕВА
СО СХВАТОМ МАНИПУЛЯТОРА**

В работе рассматривается вопрос о взаимодействии ствола дерева со схватом манипулятора на режиме подъема. Ствол дерева моделируется в виде набора жестких стержней, соединенных упругими шарнирами. Влияние кроны дерева моделируется силой сопротивления, пропорциональной скорости и, в соответствии с ее расположением, приложенной к последним стержням модели. Воздействие манипулятора на ствол дерева представлено посредством двух пружин. Вертикальная пружина моделирует приведенную вертикальную жесткость манипулятора, вторая пружина описывает жесткость, препятствующую повороту ствола в схвате манипулятора. Демпфирующие свойства манипулятора учтены путем введения в систему уравнений, описывающих механическую систему, диссипативной функции Релея. На манипулятор накладывалось кинематическое возбуждение в виде вертикального перемещения с различными режимами движения. Для рассматриваемой системы составлена и решена система уравнений Лагранжа второго рода. Изучен динамический отклик механической системы ствол дерева – манипулятор для различных режимов подъема. Получены зависимости силы воздействия ствола дерева на манипулятор от времени. Определен режим подъема, обеспечивающий наименьшие динамические нагрузки на манипулятор. Рассмотренная модель позволила учесть влияние упругости ствола дерева на силу, действующую на схват манипулятора.

Ключевые слова: ствол дерева, манипулятор, упругость, жесткость, диссипативная функция, сила сопротивления, уравнения Лагранжа.

S. A. Borisevich

Belarusian State Technological University

**THE SIMULATION OF THE TREE STEM INTERACTION WITH A GRIPPER
OF THE MANIPULATOR**

The interaction of a tree stem with a manipulator in the lift mode is considered. The tree stem is modeled as a set of rigid rods connected by elastic joints. The influence of tree crown is modeled by resistance force proportional to the velocity and by the model according to its position applied to last rods. The impact of the manipulator on a tree stem is presented in the form of two springs. The vertical spring simulates the vertical stiffness of the manipulator, the other spring describes the stiffness that prevents rotation of the stem in the manipulator. The Rayleigh dissipation function introduces damping properties of the manipulator in the system of equations describing the mechanical system. Kinematic excitation as a vertical movement with different driving modes was applied to the manipulator. The Lagrange equations of motions for the model were obtained and solved. The dynamic response of a mechanical system on kinematic excitation for various modes of motion was considered. Plots of impact force acting on the manipulator were obtained. The lift mode that causes the least dynamic response on the manipulator was determined. This model enabled us to take into account the influence of the elasticity of a tree trunk on the force acting on the manipulator.

Key words: tree stem, manipulator, elasticity, stiffness, dissipation function, resistance force, Lagrange equations.

Введение. Исследования по определению величины силы, действующей на схват манипулятора, имеют важное практическое значение. Результаты таких исследований позволят улучшить качество проектирования лесных машин и разработать оптимальные режимы работы оператора лесной машины. В данной статье используется модель ствола дерева в виде цепочки жестких звеньев, соединенных упругими шарнирами. Звенья представляют собой цилиндры, диаметры которых меняются от основания

ствола к вершине. Данная модель, составление уравнений движения для нее и алгоритм интегрирования полученных уравнений движения подробно рассмотрены в работах [1, 2]. Известно, что наиболее нагруженной операцией машин с манипулятором является разгон и торможение манипулятора при перемещении дерева. Для моделирования такой ситуации на динамическую систему ствол дерева – манипулятор накладывалось кинематическое возмущение $H(t)$ в виде его вертикального перемещения.

Целью работы являлось исследование динамического отклика системы на заданное кинематическое возбуждение в начале движения, во время движения и после остановки.

Основная часть. Представим механическую систему ствол дерева – манипулятор в виде модели, показанной на рис. 1.

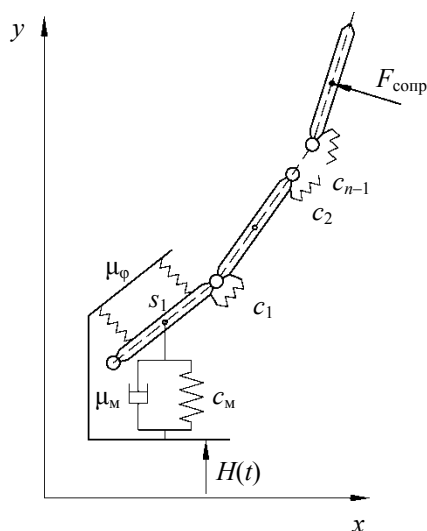


Рис. 1. Модель ствола дерева и манипулятора

В рассматриваемой модели ствол дерева представляется в виде набора жестких цилиндров, соединенных упругими связями [1]. Связи представлены s уравнениями связи Q_α , ограничивающими относительное движение стержней. Число уравнений связи $s = n - 1$, где n – число стержней. Выражения для кинетической и потенциальной энергии модели ствола дерева подробно рассмотрены в [1] и здесь не приводятся. Воздействие манипулятора на ствол дерева моделируется двумя пружинами.

Пружина с жесткостью c_m характеризует приведенную вертикальную жесткость манипулятора. Пружина с жесткостью c_ϕ характеризует жесткость манипулятора, препятствующую повороту ствола в захвате. Вклад в потенциальную энергию, обусловленный приведенными жесткостями манипулятора, будет иметь следующий вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_m (H(t) + l_{ст} - y_{C1}(t))^2 + c_\phi \varphi_1^2,$$

где $l_{ст}$ – статическая деформация пружины от силы тяжести ствола дерева; $y_{C1}(t)$ – вертикальная координата центра масс первого стержня; φ_1 – угол поворота первого стержня, отсчитываемый от начального положения ($\varphi_{10} = 30^\circ$).

Приведенную вертикальную жесткость манипулятора c_m определим из условия ограни-

чения статической деформации пружины под действием силы тяжести ствола дерева. Ограничим величину статической деформации величиной $l_{ст} = 0,01$ м. Тогда жесткость можно найти из условия равновесия

$$c_m = \frac{mg}{l_{ст}},$$

где m – масса ствола дерева.

Величину жесткости c_ϕ ввиду отсутствия ее значения в литературе определим из условия малого поворота первого стержня в захвате манипулятора. В данной работе принято значение $c_\phi = 6 \cdot 10^4$ Н/м.

Воздействие кроны на движение ствола моделировалось силой сопротивления, приложенной к последним стержням модели в соответствии с ее расположением. Силу сопротивления воздуха, действующую на крону дерева, полагаем линейной по скорости [3]. При линейной зависимости силы сопротивления от скорости, для вычисления обобщенной силы сопротивления удобно ввести диссипативную функцию Φ . Релея. Кроме того, в диссипативную функцию введено слагаемое, характеризующее демпфирующее свойство манипулятора. Таким образом, выражение для диссипативной функции примет вид

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \mu_k \frac{v_{Ck}^2}{2} + \frac{1}{2} \mu_m \dot{y}_{C1}^2,$$

где μ_k – коэффициент сопротивления кроны дерева; v_{Ck} – скорость центра масс k -го стержня; μ_m – коэффициент сопротивления, характеризующий демпфирующие свойства манипулятора; \dot{y}_{C1} – вертикальная составляющая скорости центра масс первого стержня.

Дифференциальные уравнения движения модели следуют из уравнений Лагранжа второго рода с множителями:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_k} + \sum_{\alpha=1}^s \lambda_\alpha \frac{\partial Q_\alpha}{\partial q_k},$$

$$(k = 1, \dots, n),$$

где q_k – обобщенные координаты (координаты центров масс стержней и их углы поворота); λ_α – неопределенные множители Лагранжа.

Для последующих расчетов использовался коэффициент сопротивления кроны сосны $\mu_k = 100$ Нс, найденный в работе [3]. Коэффициент сопротивления, характеризующий демпфирующие свойства манипулятора μ_m , принимался равным $\mu_m = 4 \cdot 10^3$ Нс из условия затухания колебаний в течение времени порядка 1 с. Параметры ствола дерева принимались следующие:

длина ствола $l = 19$ м, масса $m = 340$ кг, диаметр ствола у основания $d = 20$ см, модуль упругости древесины $E = 1,2 \cdot 10^{10}$ Па, плотность древесины $\rho = 780$ кг/м³. Во всех дальнейших расчетах ствол дерева разбивался на 10 цилиндров.

Рассмотрим поведение системы, если кинематическое возбуждение имеет вид

$$H(t) = vt,$$

где v – скорость подъема ствола дерева ($v = 1$ м/с).

При таком режиме подъема манипулятор приобретает скорость мгновенно, затем движется с постоянной скоростью и мгновенно останавливается (рис. 2). Здесь и во всех рассмотренных далее режимах манипулятор поднимался на высоту $h = 1$ м за время $t = 1$ с.

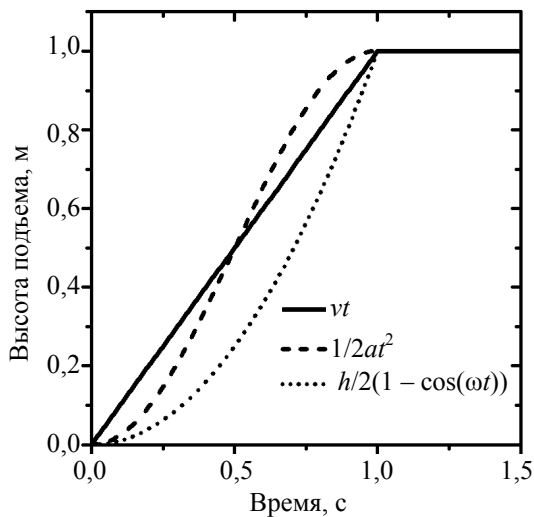


Рис. 2. Вид функций $H(t)$

На рис. 3 представлен динамический отклик системы (вертикальной координаты центра масс первого стержня $y_{s1}(t)$) на кинематическое возмущение. График показывает, что в начале движения в результате мгновенного появления скорости значения координаты $y_{s1}(t)$ отстают от значений функции $H(t)$, а после окончания подъема манипулятор совершает затухающее колебательное движение вдоль вертикальной оси. Очевидно, что отклонения значений координаты от значений возмущающей функции вызовут появление дополнительной силы, воздействующей на манипулятор.

Вычислим вертикальную составляющую силы по формуле

$$F_y = c_m(H(t) - y_{s1}(t) + l_{ct}).$$

Зависимость силы от времени приведена на рис. 4.

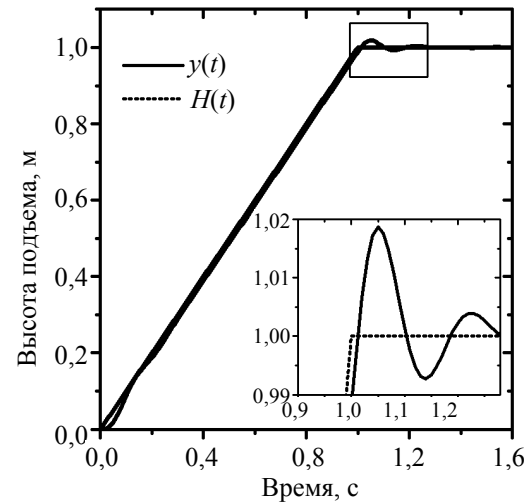


Рис. 3. Динамический отклик системы при $H(t) = vt$

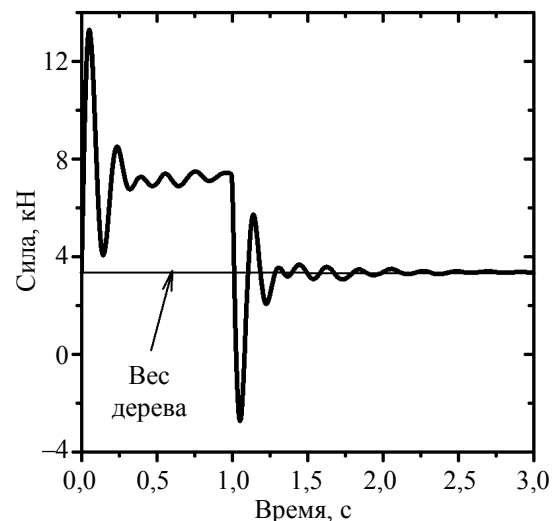


Рис. 4. Зависимость вертикальной составляющей силы от времени при $H(t) = vt$

Из рис. 4 видно, что при таком режиме перемещения в начале движения на манипулятор воздействует переменная сила с максимальной амплитудой, в 4 раза превышающей вес поднимаемого дерева. После остановки сила изменяет направление, и максимальное ее значение равняется весу дерева.

Рассмотрим поведение механической системы, если кинематическое возбуждение имеет следующий вид:

$$H(t) = \frac{1}{2}at^2,$$

где a – ускорение подъема ствола дерева.

В этом случае манипулятор движется ускоренно, причем скорость изменяется от нуля, и схват мгновенно останавливается после подъема (рис. 2).

На рис. 5 представлен динамический отклик системы (вертикальной координаты) на кинематическое возмущение.

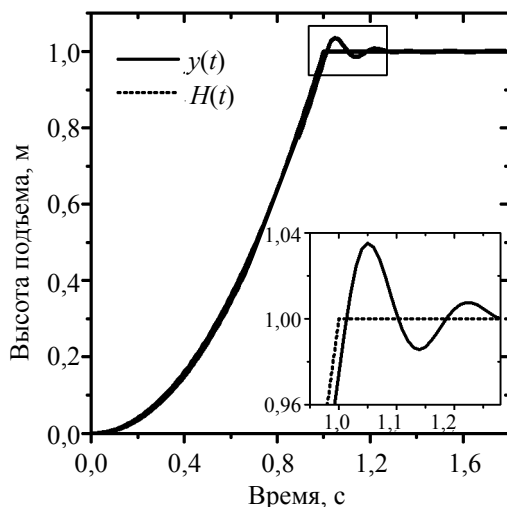


Рис. 5. Динамический отклик системы при $H(t) = 1/2at^2$

Из рис. 5 следует, что при изменении скорости от нуля значения координаты $y_{sl}(t)$ не отличаются от значений функции $H(t)$, а после окончания подъема манипулятор совершает затухающее колебательное движение вдоль вертикальной оси с большей амплитудой, чем в предыдущем случае.

График зависимости силы от времени представлен на рис. 6. Из рис. 6 видно, что при таком режиме перемещения сила плавно нарастает до максимальной величины, равной 12 кН, и после внезапной остановки направление силы изменяется, причем максимальная ее величина составляет 8 кН.

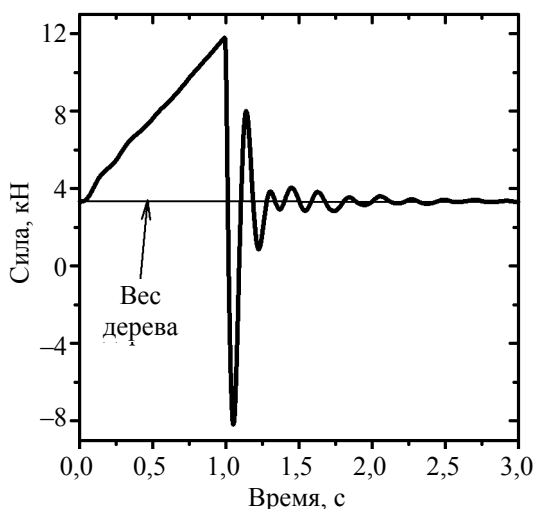


Рис. 6. Зависимость вертикальной составляющей силы от времени при $H(t) = 1/2at^2$

Рассмотрим поведение системы, если кинематическое возмущение имеет вид

$$H(t) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T} t \right).$$

В этом случае скорость манипулятора изменяется от нуля и после подъема плавно уменьшается до нуля (рис. 2).

На рис. 7 представлен динамический отклик системы (вертикальной координаты) на кинематическое возмущение.

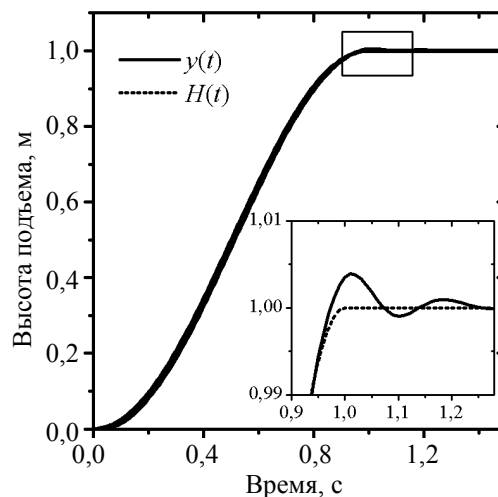


Рис. 7. Динамический отклик системы

$$\text{при } H(t) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T} t \right)$$

Из рис. 7 следует, что значения координаты $y_{sl}(t)$ не отличаются от значений функции $H(t)$, а после окончания подъема манипулятор совершает затухающее колебательное движение вдоль вертикальной оси с амплитудой, не превышающей величину статической деформации пружины.

График зависимости силы от времени представлен на рис. 8.

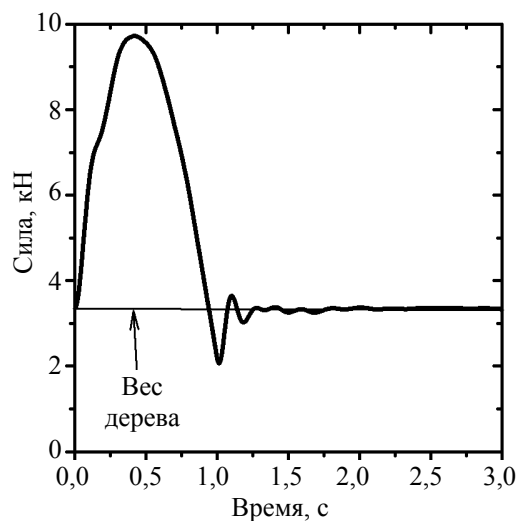


Рис. 8. Зависимость вертикальной составляющей силы от времени при $H(t) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T} t \right)$

Из рис. 8 видно, что в этом случае силы, воздействующие на манипулятор, значительно меньше, чем в предыдущих случаях. Значение силы плавно увеличивается, и в середине подъема, когда ускорение поменяло знак, сила начинает уменьшаться. По окончании подъема сила не достигает больших значений и быстро стремится к значению силы тяжести дерева.

Заключение. Рассмотрено поведение механической системы ствол дерева – манипулятор

при различных видах кинематического возбуждения. Установлено, что наиболее благоприятный режим для движения манипулятора наблюдается в случае, когда схват перемещается ускоренно с нулевой начальной скоростью и после подъема скорость постепенно уменьшается до нуля. Полученные результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций операторам машин с манипулятором и для усовершенствования процессов проектирования лесных машин.

Литература

1. Борисевич С. А. Конечно-разностная схема для исследования падения ствола дерева // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 104–107.
2. Борисевич С. А. Взаимодействие падающего дерева с упругим основанием и лесной машиной // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 129–133.
3. Борисевич С. А., Камлюк А. Н., Ребко Д. В. Определение сопротивления движению кроны дерева // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 34–36.

References

1. Borisevich S. A. The finite-difference scheme to simulate the motion of a tree stem. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 104–107 (In Russian).
2. Borisevich S. A. Falling tree interaction with an elastic base and forestry machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 129–133 (In Russian).
3. Borisevich S. A., Kamlyuk A. N., Rebko D. V. Determination of the resistance to the moving tree crown. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 34–36 (In Russian).

Информация об авторе

Борисевич Сергей Анатольевич – ассистент кафедры теоретической механики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: borsera@belstu.by

Information about the author

Borisevich Sergey Anatol'yevich – assistant, the Department of Theoretical Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borsera@belstu.by

Поступила 12.03.2015